

УДК 504.5:621.039.1:597.851

ИССЛЕДОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ОЗЕРНОЙ ЛЯГУШКОЙ (*PELOPHYLAX RIDIBUNDUS* PALL.) В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ КАК ИНДИКАТОР АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

© 2016 г. М.Я. Чеботина¹, В.П. Гусева¹, В.Г. Ищенко¹, Д.Л. Берзин²

¹ ФГБУН «Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук», г. Екатеринбург, Россия

² ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

Ключевые слова: озерная лягушка, сеголетки, головастики, накопление радионуклидов, загрязнение водного объекта, Белоярское водохранилище, Верхнетагильское водохранилище, река Тагил, ⁹⁰Sr, ^{134,137}Cs.



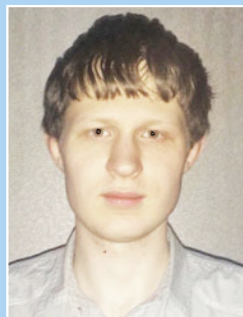
М.Я. Чеботина



В.П. Гусева



В.Г. Ищенко



Д.Л. Берзин

Исследовано накопление антропогенных радионуклидов ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в озерной лягушке (*Pelophylax ridibundus* Pall.) в районах расположения Белоярского и Верхнетагильского водохранилищ на Урале, подверженных антропогенному загрязнению. Постановка работы обусловлена широким распространением данного вида амфибий в водоемах, отсутствием в литературе данных по радиэкологии озерной лягушки, а также тем, что данные исследования могут служить хорошим индикатором антропогенного загрязнения.

Определены уровни накопления радионуклидов лягушкой в промливневом канале Белоярской АЭС, характеризующемся повышенным сбросом ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в экосистему канала. Для сравнения выбрана р. Тагил в месте сброса воды из Верхнетагильского водохранилища – водоема-охладителя Верхнетагильской ГРЭС. Установлено отсутствие достоверных различий в накоплении радионуклидов

в зависимости от пола и возраста амфибий. Оценены сравнительные уровни накопления радионуклидов озерной лягушкой по сравнению с другими представителями водной экосистемы. На примере промливневого канала показано, что накопление ^{90}Sr снижается в ряду: планктон > лягушки, растения, грунт > ихтиофауна, а ^{137}Cs – планктон > растения > лягушки, грунт > ихтиофауна. Содержание ^{137}Cs в животных из промливневого канала оказалось достоверно ниже, чем в р. Тагил. Высказано предположение о наличии неидентифицированного источника радиоактивного загрязнения амфибий, откуда ^{137}Cs переносится лягушкой в р. Тагил.

Исследование роли животных в водных экосистемах, как индикатора антропогенного загрязнения, является важной научно-практической задачей при изучении процессов накопления и распространения техногенных радионуклидов в пространстве и по пищевым цепям. В процессе исследований основное внимание обычно уделяется рыбе как продукту питания человека. Остальные обитатели пресноводных водоемов, в т. ч. озерные лягушки, изучены слабо. В связи с высокой мобильностью в воде и на суше озерные лягушки могут переносить радионуклиды и химические поллютанты из загрязненных территорий и тем самым способствовать их распространению в окружающей среде.

Озерная лягушка (*Pelophylax ridibundus* Pall.) – один из широко распространенных чужеродных видов амфибий – случайно попала в водоемы Уральского региона и расселилась на значительной территории [1, 2]. Экологические особенности этого вида изучены и описаны в работах [3–5]. Показано, что озерные лягушки достаточно толерантны к химическим загрязнениям и повышенным температурам водной среды, а личинки амфибии способствуют очищению воды от поступающих с промышленными стоками поллютантов органической и неорганической природы [6–8]. Излюбленным местом обитания озерной лягушки служат зоны подогрева водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций, где создаются благоприятные условия для жизни и размножения лягушек в течение всего года. Однако в условиях умеренных широт она благополучно живет и размножается при более низких температурах.

К настоящему времени вопрос о накоплении радионуклидов лягушками в зонах размещения предприятий ядерно-топливного цикла слабо изучен. В работе [9] приводятся данные о накоплении $^{134,137}\text{Cs}$ в некоторых видах лягушек 20-километровой зоны Фукусимской АЭС после аварии 2011 г. Во взрослых лягушках и сеголетках, обитающих в озере, концентрации радионуклида варьировали от 68 до 750 Бк/кг сырой массы. Работы [10, 11] посвящены исследованию накопления и оценке доз облучения лягушек *Rana arvalis*, оби-

тающих в заболоченных экосистемах центрально-восточной части Швеции через 17 лет после Чернобыльской аварии. По результатам исследования, средняя концентрация ^{137}Cs в лягушках составила $1,7 \pm 1,1$ кБк/кг сырой массы, при этом наиболее высокие значения отмечены для самых мелких особей амфибий (3,5 кБк/кг сырой массы). Авторами оценены коэффициенты накопления радионуклида лягушками по отношению к его концентрации в почве и воде. Несмотря на то, что в почве содержалось ^{137}Cs значительно больше, чем в воде, коэффициенты накопления радионуклида в лягушках по отношению к воде (2500–19100) были выше, чем к почве (0,006–7).

Цель данной работы – исследовать уровни накопления антропогенных радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs озерной лягушкой в районах размещения Белоярского и Верхнетагильского водохранилищ в Свердловской области.

Белоярское водохранилище, являющееся водоемом-охладителем Белоярской АЭС (БАЭС), образовано в 1959–1963 гг. путем зарегулирования русла р. Пышмы в 75 км от ее истока. Протяженность водоема около 20 км, ширина на уровне АЭС около 3-х км. Глубина по фарватеру р. Пышмы достигает 15–20 м, средняя глубина 8–9 м. Площадь зеркала водоема составляет примерно 47 км². Белоярская атомная электростанция расположена на левом берегу водохранилища в 7 км от плотины. Она была введена в эксплуатацию в 1964 г. Первый и второй энергоблоки станции к настоящему времени уже выведены из эксплуатации. В 1980 г. запущен третий энергоблок корпусного типа на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (БН-600), который работает и в настоящее время. За период работы станции сотрудниками Института экологии растений и животных УрО РАН достаточно подробно изучены экологические особенности водоема-охладителя, выявлены закономерности накопления и распределения антропогенных радионуклидов в различных компонентах Белоярского водохранилища, находящегося под длительным воздействием Белоярской АЭС. Результаты этих работ описаны в ряде статей и монографий [12–17].

Основным путем поступления радионуклидов в Белоярское водохранилище от АЭС в настоящее время является промливневый канал (ПЛК), куда сбрасываются дебалансные воды станции. Они включают воды, прошедшие спецводоочистку, воды спецпрачечных, душевых, талые и ливневые воды с территории станции; кроме того, сюда же поступают воды с соседнего предприятия – Института реакторных материалов, где работает экспериментальный реактор. Периодическое обследование радиоэкологического состояния ПЛК подтвердило факт надфоновое загрязнение воды, гидробионтов и грунтов канала ^{90}Sr и ^{137}Cs (вода, 2004 г. – 0,02 и 0,012 Бк/л; грунт, 2003 г. – 10–30 и 3000–6000 Бк/кг; рдест гребенчатый, 1980 г. – 104 и 95000 Бк/кг в расчете на сухую массу по ^{90}Sr и ^{137}Cs соответственно). ПЛК,

не замерзающий в холодный период года, облюбовали озерные лягушки, визуальная численность которых достаточно велика. Выполнение данного исследования связано с тем, что в литературе отсутствуют данные о накоплении радиоактивных загрязнителей этим видом амфибий в зонах постоянного сброса радионуклидов в водную среду предприятиями ядерно-топливного цикла и, в частности, Белоярской АЭС.

Для сравнительной оценки накопления радионуклидов озерной лягушкой выбран район расположения Верхнетагильского водохранилища, удаленный на > 100 км на северо-запад от Белоярской АЭС и характеризующийся массовым скоплением озерной лягушки. Водоем образован в 1960 г. в районе слияния рек Тагил и Вогулка. Площадь зеркала водоема 3,5 км², средняя глубина 3,8 м, максимальная глубина 5 м. Водоохранилище служит в качестве водоема-охладителя Верхнетагильской ГРЭС (1500 мВт). Подогретая вода используется для обеспечения горячей водой населения и предприятий г. Верхнего Тагила. По характеру теплового баланса Верхнетагильское водохранилище относится к категории водоемов с сильным перегревом, т. к. температура воды в нем постоянно превышает температуру воды в естественных водоемах более чем на 6 °С. В середине вегетационного периода температурный показатель колеблется в пределах 30 °С, а в наиболее холодное время не опускается ниже 8–10 °С. Озерная лягушка была завезена в водохранилище из Краснодарского края в 1980-х гг. при зарыблении водоема белым амуром [1, 8] и широко распространилась в экосистемах сообщающихся рек и водоемов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование выполняли в 2013–2014 гг. на промливневом канале, соединяющем БАЭС с Белоярским водохранилищем и р. Тагил ниже плотины, через которую происходит сброс воды из Верхнетагильского водохранилища. Объектами исследования служили озерные лягушки, в т. ч. взрослые особи и сеголетки, головастики, рыбы и мальки рыб, водные растения, планктон, грунт.

Лягушек, лягушат, головастиков и мальков рыб отлавливали при помощи сачков и усыпляли эфиром. В процессе отбора материала лягушек отлавливали в количестве 43 и 15 взрослых особей в ПЛК и р. Тагил, соответственно. Лягушат – 4 особи, мальков рыб – 375 г, головастиков – 130 г. Растения, рыбу, песчано-илистый грунт отбирали в трех повторностях по 2–3 кг на повторность. Планктон отбирали из слоя 0–1 м от поверхности воды при помощи сачков, изготовленных из мельничного газа с размером пор 0,067 мм. После отбора все пробы транспортировали в лабораторию, высушивали, озоляли при температуре 450 °С, после чего определяли в них содержание радионуклидов.

В лаборатории у лягушек измеряли длину тела, определяли пол и возраст. Для определения возраста использовали срезы толщиной 15–18 мкм второй фаланги 4-го пальца правой задней конечности амфибии. После декальцинации пальцев в течение пяти часов в 5 % HNO_3 готовили срезы на замораживающем микротоме, три минуты окрашивали гематоксилином и помещали в глицерин для сохранения материала. В процессе обработки данных определяли наружный диаметр среза и средние диаметры всех линий остановки роста, т. е. линий, образованных во время зимовки. Таким образом, возраст определяется как количество пережитых зимовок [18–20].

Концентрацию ^{90}Sr в пробах золы определяли радиохимическим методом, основанным на выщелачивании химических элементов 6-ти нормальной соляной кислотой с последующим осаждением оксалатов щелочно-земельных элементов и выделением из раствора ^{90}Sr в виде карбонатов. Содержание ^{90}Sr определяли по дочернему ^{90}Y после их разделения безугольным аммиаком. Радиометрию полученных осадков производили на малофоновой установке УМФ-2000 при статистической ошибке счета 10–15 %.

Концентрацию $^{134,137}\text{Cs}$ определяли с помощью многоканальных γ -анализаторов фирмы «Canberra-Packard» и «ORTEC» при ошибке измерений не более 10–20 %. Для повышения эффективности просчета золу лягушек объединяли по принципу пола и длины тела. В процессе анализа проб ^{134}Cs был обнаружен только в двух особях амфибий из ПЛК и р. Тагил, содержащих аномально высокое для данных популяций количество ^{137}Cs . В остальных пробах ^{134}Cs отсутствовал.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены результаты индивидуальных измерений концентраций ^{90}Sr и ^{137}Cs в лягушках, обитающих в ПЛК и р. Тагил. Показано, что концентрация ^{90}Sr в животных из ПЛК варьирует от 2 до 25 Бк/кг при среднем значении 10 ± 1 Бк/кг, а в р. Тагил – от 1 до 13 Бк/кг при среднем значении 6 ± 1 Бк/кг в расчете на сухую массу. Таким образом, в обоих местобитаниях различие между минимальными и максимальными значениями концентраций исследованных радионуклидов в разных особях амфибий составило более чем 10 раз. При этом средние уровни концентраций ^{90}Sr в популяции животных из ПЛК были выше, чем в р. Тагил.

Содержание ^{137}Cs в популяции лягушек в р. Тагил оказалось неожиданно более высоким, чем в ПЛК. В частности, если в ПЛК концентрация радионуклида в амфибиях варьировала от 8 до 26 Бк/кг при среднем значении 18 ± 2 Бк/кг, то в р. Тагил – от 11 до 100 Бк/кг при среднем значении 48 ± 10 Бк/кг.

Кроме указанных выше данных, в каждой из популяций обнаружено по одной особи амфибий, которые не были представлены на рис. 1 в связи с

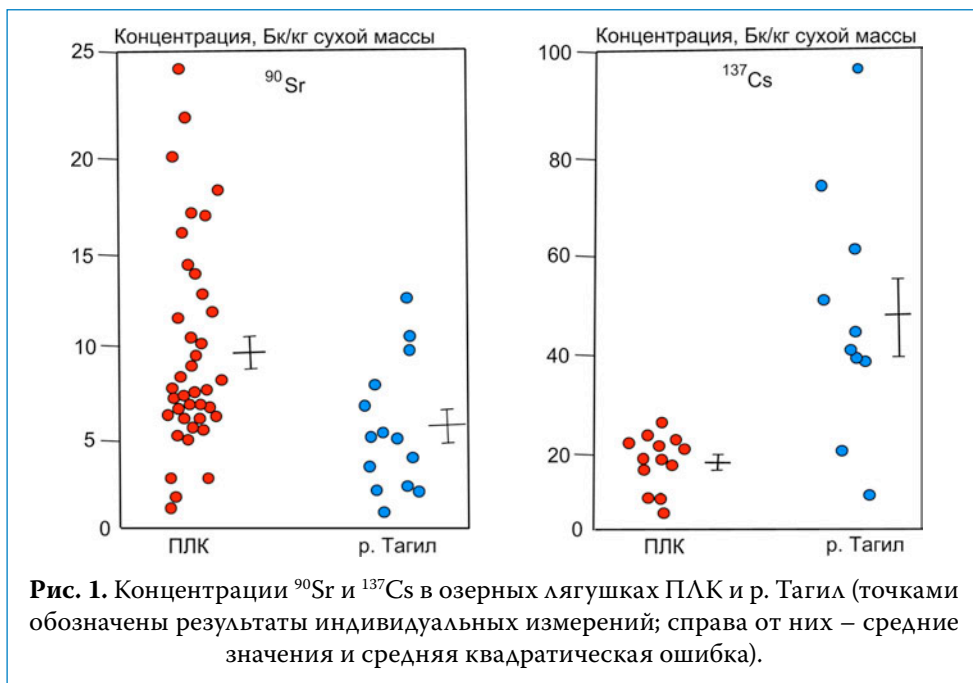


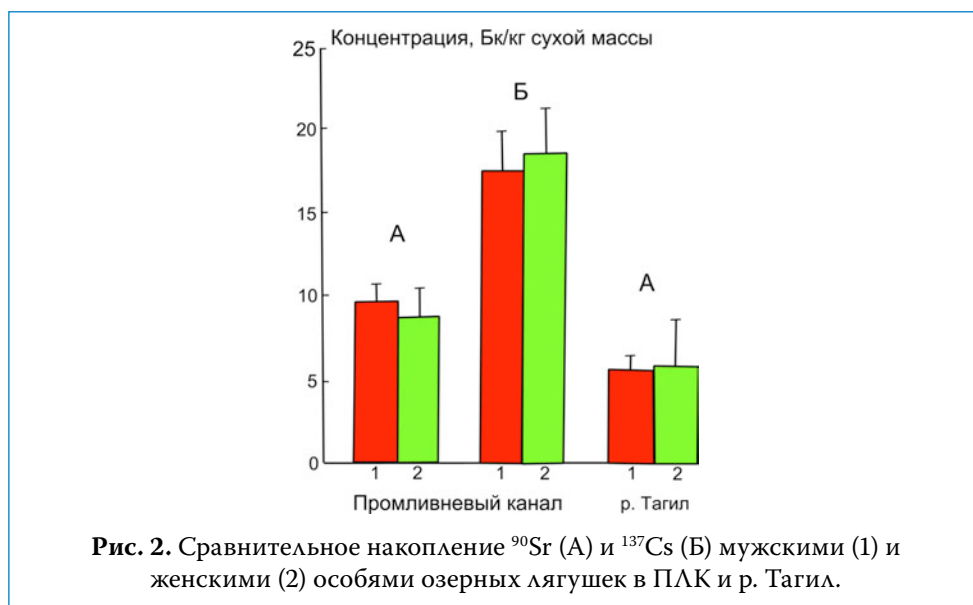
Рис. 1. Концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в озерных лягушках ПЛК и р. Тагил (точками обозначены результаты индивидуальных измерений; справа от них – средние значения и средняя квадратическая ошибка).

тем, что по уровню содержания ^{137}Cs они на несколько порядков величин превышали самые высокие показатели. В частности, в ПЛК лягушка содержала 45 000, а из р. Тагил – 53 000 Бк/кг ^{137}Cs . Следует заметить, что подобный результат получен в работе [9], где одна лягушка (*Buergeria bergeri*), обитающая в лесу в 20-километровой зоне Фукусимской АЭС после аварии 2011 г., имела особенно высокое содержание цезия (160 000 Бк/кг сырого веса) по сравнению со средними значениями в других лягушках.

Данные, представленные на рис. 1, подвергнуты статистической обработке с помощью компьютерной программы STATISTICA по критерию Стьюдента. Подтверждено, что лягушки из популяции ПЛК накапливают ^{90}Sr достоверно больше, чем аналогичные животные из р. Тагил ($p = 0,004$). В то же время ^{137}Cs накапливается лягушками в ПЛК достоверно меньше, чем в р. Тагил ($p = 0,00067$).

Исследование содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в озерных лягушках разного пола из популяции ПЛК не выявило различий в накоплении радионуклидов мужскими и женскими особями (рис. 2). Для популяции лягушек р. Тагил аналогичные данные получены по ^{90}Sr , для сравнительной оценки ^{137}Cs в этом случае недостаточно данных.

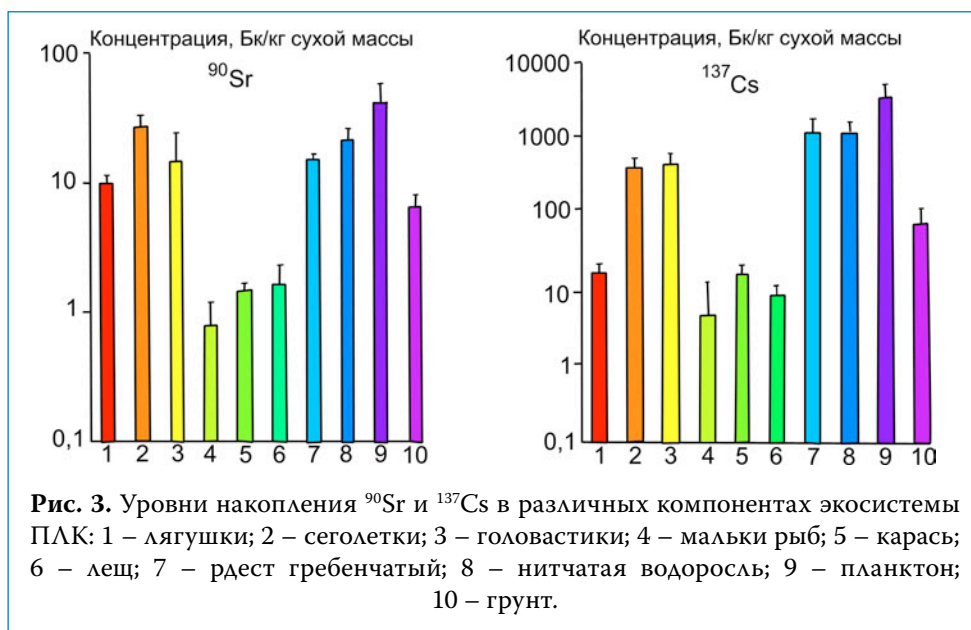
Установлено, что в популяции взрослых лягушек ПЛК отсутствует достоверная корреляционная связь между концентрацией ^{90}Sr в организме и



возрастом амфибий от 1 до 4 лет (коэффициент корреляции – 0,043). В то же время отмечена тенденция к снижению накопления этого радионуклида лягушками с увеличением сухой массы тела (коэффициент корреляции – 0,314), что, возможно, связано со снижением интенсивности ассимиляционных процессов по мере старения организма.

На примере ПАК, в котором зарегистрировано большее разнообразие гидробионтов по сравнению с р. Тагил, изучены уровни накопления исследуемых радионуклидов лягушками разных возрастных категорий (взрослые лягушки, сеголетки, головастики) по сравнению с другими представителями водной экосистемы канала (планктон, рыбы, растения, грунт). Как следует из рис. 3, оба радионуклида накапливаются в наибольшей степени планктоном (^{90}Sr – 44 ± 2 Бк/кг, ^{137}Cs – 3430 ± 180 Бк/кг сухой массы), в наименьшей – представителями ихтиофауны (^{90}Sr – 0,83–1,7 Бк/кг, ^{137}Cs – 5–17 Бк/кг сухой массы). Среди амфибий сеголетки и головастики накапливают оба радионуклида больше, чем взрослые лягушки, что, вероятно, связано с большим вкладом планктона в пищевую рацион молодых особей амфибий по сравнению с взрослыми лягушками.

Что касается р. Тагил, то в месте отбора проб концентрация ^{90}Sr в прикрепленных водных растениях (элодея, уруть, роголистник) оказалась примерно в 2–4 раза, а ^{137}Cs – на 2 порядка величин ниже, чем в ПАК. На основании этого можно считать экосистему р. Тагил ниже плотины радиоэкологически более чистой, чем ПАК, куда поступают слаборадиоактивные



сбросы АЭС. Относительно более высокое содержание ^{137}Cs в лягушках р. Тагил заставляет предположить, что они накопили данный радионуклид в другом месте. Это подтверждает тот факт, что некоторые амфибии содержали особенно высокие концентрации радионуклида.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования роли озерной лягушки (*Pelophylax ridibundus* Pall.) как индикатора антропогенного загрязнения в накоплении радионуклидов ^{90}Sr и $^{134,137}\text{Cs}$ в районах размещения Белоярского и Верхнетагильского водохранилищ на Урале.

Оценены уровни накопления радионуклидов озерной лягушкой по сравнению с другими представителями водной экосистемы. В результате исследования установлено, что взрослые лягушки из популяции промливневого канала накапливают ^{90}Sr (10 ± 1) достоверно больше, чем животные из р. Тагил (6 ± 1 Бк/кг сухой массы). В то же время содержание ^{137}Cs в животных из промливневого канала (18 ± 2) оказалось достоверно ниже, чем в р. Тагил (48 ± 10 Бк/кг сухой массы). Установлено отсутствие различий в накоплении радионуклидов взрослыми амфибиями в зависимости от пола и возраста. На примере промливневого канала показано, что накопление ^{90}Sr снижается в ряду: планктон > лягушки, растения, грунт > ихтиофауна, а ^{137}Cs – планктон > растения > лягушки, грунт > ихтиофауна. В обоих местообитаниях озерных лягушек обнаружено по одной особи, содержащей

повышенные концентрации ^{137}Cs (промливневой канал – 45000, р. Тагил – 53000) и ^{134}Cs (441 и 320 Бк/кг сухой массы, соответственно). Так как появление ^{134}Cs в объектах окружающей среды связано с работой предприятий ядерно-топливного цикла, то озерные лягушки тагильской популяции могут накапливать данный радионуклид только на загрязненной ^{134}Cs территории и переносить его за пределы территории, которая ограничивается ареалом распространения миграционных путей данного вида амфибий. В случае промливневого канала это можно объяснить мобильностью данной особи на территории санитарно-защитной зоны Белоярской АЭС и посещением относительно более «грязных» мест, а в р. Тагил – наличием в данном регионе неидентифицированного источника радиоактивного загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Топоркова Л.Я., Боголюбова Т.В., Хафизова Р.Т.* К экологии озерной лягушки, индуцированной в водоемы горно-таежной зоны Среднего Урала // Фауна Урала и Европейского Севера. Свердловск: Изд-во Урал. гос. ун-та, 1979. С. 108–115.
2. *Иванова Н.Л.* Особенности экологии озерной лягушки (*Rana ridibunda* Pall.), интродуцированной в водоемы-охладители // Экология. 1995. № 6. С. 473–476.
3. *Иванова Н.Л.* Озерная лягушка (*Rana ridibunda* Pall.) в водоемах-охладителях на Среднем Урале // Экология. 2002. № 2. С. 137–141.
4. *Вершинин В.Л., Иванова Н.Л.* Специфика трофических связей вида-вселенца (*Rana ridibunda* Pallas, 1771) в зависимости от условий обитаний // Поволж. экол. журн., 2006. № 3. С. 12–15.
5. *Иванова Н.Л., Жигальский О.А.* Демографические особенности популяций озерной лягушки (*Rana ridibunda* Pall.), интродуцированной в водоемы Среднего Урала // Экология. 2011. № 5. С. 381–369.
6. *Мисюра А.Н., Тарасенко С.Н., Булахов В.Л., Бобылев Ю.П., Винниченко А.Н., Варенко Н.И., Орленко А.Н.* Способ очистки воды от тяжелых металлов // Авт. свид-во № 1229185. Оpubл. в бюл. СО2ГЗ/32. 1986. 3 с.
7. *Мисюра А.Н.* Экология фоновых амфибий центрального степного Приднепровья в условиях промышленного загрязнения водоемов: автореф. дис.... канд. биол. наук. М., 1989. 22 с.
8. *Вершинин В.А.* Амфибии и рептилии Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 170 с.
9. *Matsushima N., Ihara S., Takase M., Horiguchi T.* Assessment of radiocesium contamination in frogs 18 months after the Fukushima Daiichi nuclear disaster // Sci. reports. 2015. Vol. 5. P. 1–6.
10. *Stark K., Avila R., Wallberg P.* Estimation of radiation doses from ^{137}Cs to frogs in a wetland ecosystem // J. of Environmental Radioactivity. 2004. Vol. 75. P. 1–14.
11. *Stark K.* Risk from radionuclides: a frog's perspective. Accumulation of ^{137}Cs in a riparian wetland, radiation doses, and effects on frogs and toads after low-dose rate exposure. Stockholm, Department of Systems Ecology Stockholm University. 2006. 34 p.

12. Чеботина М.Я., Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Куликов Н.В. Радиоэкологические исследования Белоярского водохранилища. Свердловск: УрО АН СССР, 1992. 77 с.
13. Чеботина М.Я., Николин О.А. Радиоэкологические исследования трития в Уральском регионе. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 90 с.
14. Трапезников А.В., Чеботина М.Я., Трапезникова В.Н., Гусева В.П., Николин О.А. Влияние АЭС на радиоэкологическое состояние водоема-охладителя. Екатеринбург: АкадемНаука, 2008. 398 с.
15. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н. Пресноводная радиоэкология. Екатеринбург: АкадемНаука, 2012. 544 с.
16. Chebotina M.Ya., Guseva V.P., Polyakov E.V. Zooplankton of the cooling reservoir of the Beloyarskaya atomic power station: species characteristics and accumulative ability. Ch. 5 / In «Zooplankton: species diversity, distribution and seasonal dynamics», P. 127–148 / Ed. G. Kehayias. Published by Nova Science Publishers, Inc. New York, 2014. 252 p.
17. Чеботина М.Я., Гусева В.П., Трапезников А.В. Планктон и его роль в миграции радионуклидов в водоеме-охладителе АЭС. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 170 с.
18. Клейненберг С.Е., Смирин Э.М. Метод определения возраста у амфибий // Зоолог. журн. 1969. Т. 48. С. 1090–1094.
19. Смирин Э.М. Годовые слои в костях травяной лягушки (*Rana temporaria*) // Зоолог. журн. 1972. Т. 51. Вып. 10. С. 1529–1534.
20. Castanet J., Smirina E.M. Introduction to the skeletochronological method in amphibians and reptiles // Ann. Sci. Nat. Zool. 1990. Vol. 11. P. 191–196.

Сведения об авторах:

Чеботина Маргарита Яковлевна, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202; e-mail: Chebotina@ipae.uran.ru

Гусева Валентина Петровна, канд. биол. наук, научный сотрудник, ФГБУН «Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202; e-mail: Guseva@ipae.uran.ru

Ищенко Владимир Георгиевич, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202; e-mail: zoovginnv@pm.convex.ru (pm.convex.ru)

Берзин Дмитрий Леонидович, аспирант, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 21; e-mail: smithbdl@rambler.ru